

三峡库区农田氨挥发及其消减措施研究进展^①

杨 杉^{1,2}, 吴胜军², 王 雨², 周文佐¹, 程 辉², 叶 飞², 黄 培², 黄 平^{2*}

(1 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2 中国科学院水库水环境重点实验室, 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘 要: 从分析农田氨挥发的机理入手, 在分析国内外氨挥发研究现状的背景下, 综述了三峡库区农田氨挥发受气候、土壤理化性质、田间管理措施等因素的影响程度及其消减措施的研究进展, 提出了应将农田氨挥发作为库区气态氮损失的研究重点, 同时在研究方法、时空尺度、地域特殊影响因素, 以及消减措施等方面进行更深入的探索。

关键词: 氨挥发; 影响因素; 三峡库区; 农田生态系统

中图分类号: S153

氨挥发是指氨从土壤表面(旱田)或田面水表面(水田)逸散至大气所发生的物理化学变化过程^[1], 会严重影响农田生态系统生产力和氮肥利用率^[2–4]。研究表明, 1990—2005 年期间, 我国农田氨挥发氮素损失估算总量从 1.8 Tg 增加到 3.6 Tg, 年均增长率达到 25.4%^[2,5]。土壤氮素通过氨挥发损失, 90% 会直接进入大气^[6], 势必增加大气氧化活性和空气中碱性物质含量, 加速大气环境化学行为, 加剧大气污染程度; 挥发至大气中的氨或随氮沉降又重新返回地面^[6], 增加陆地生态系统和水生生态系统氮素的环境负荷, 造成土壤酸化、水体富营养化等生态环境问题^[2,6–7], 对不同生态系统的结构和功能稳定构成潜在威胁。

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原过渡地带, 涉及因三峡工程修建而被淹没的湖北省和重庆市 25 个县市区, 总面积 5.79 万 km²^[8]。库区人口密集, 截止到 2010 年底, 库区户籍人口数为 1 518 万人^[9], 人口密度 262 人/km², 是全国平均人口密度的近 2 倍^[10]。以传统的粮食种植为主, 在山地地形条件下, 可利用的耕地面积有限^[8,10], 因而坡下旱地和坡脚水田是库区坡耕地开发的典型模式^[11–12]。随着三峡工程建成并正式蓄水, 大量移民后靠安置, 库区人口承载压力陡增, 人地矛盾突出, 面源污染加剧, 库区水体富营养化和“水华”现象频发^[8,10], 其生态环境问题受到国内外广泛关注。2010 年, 化肥施用量仅重庆就近 100 万 t, 其单位面积耕地用量均居西部

乃至全国前列, 远远超过作物需求和土地载荷^[9]。受母质或耕作影响, 库区土壤类型以紫色土、黄壤和水稻土为主^[8], 氮肥施入后易通过氨挥发损失, 加之不合理的施肥方式与耕作管理技术导致库区氮素损失更加严重, 活性氮负荷逐年增加, 且农田氨挥发的贡献较大^[12]。据库区特定小流域的估算, 其农田氨挥发导致的氮损失占施氮量的 8.8%~17.6%^[11–13], 可见农田挥发对于库区农业生产和生态环境保护的重要性。

因此, 开展三峡库区农田氨挥发影响因素及消减措施等相关研究, 有助于提高库区氮肥利用率, 减少大气活性氮负荷, 缓解日益突出的生态环境问题, 为库区氮素管理提供理论依据。鉴于目前三峡库区农田氨挥发相关报道较少, 本文结合国内外农田氨挥发研究成果, 综述了库区农田氨挥发影响因素及其消减措施研究进展, 并对未来发展趋势作一展望。

1 农田氨挥发的机理

农田氨挥发过程发生于土-气界面。氮素进入土壤后, 氨挥发涉及到的氮素形态转化过程, 如图 1 所示。旱地和水田是我国主要的耕地类型, 氮肥施入旱地或水田后, 其氮肥中含有的或能产生的代换性 NH_4^+ 在各种有利于氨挥发因素的影响下, 易与土壤中的水结合生成液相的 NH_3 , 最终转化成为气态 NH_3 从旱地或水田中挥发至大气^[1]。但两者的氨挥发过程各有差异: 在旱地, 氨挥发直接通过土表进行, 液相指土

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-14)和重庆市基础与前沿研究项目(cstc2013jcyjA0302)资助。

* 通讯作者(huangping@cigit.ac.cn)

作者简介: 杨杉(1989—), 女, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业面源污染消减与湿地物质循环及其生态过程。E-mail: yangshan@cigit.ac.cn

壤溶液,气相指土壤空气;而在淹水种稻下,液相是田面水,气相是指紧接田面水表面的空气,氨挥发发生在田面水与大气的交界面^[1]。

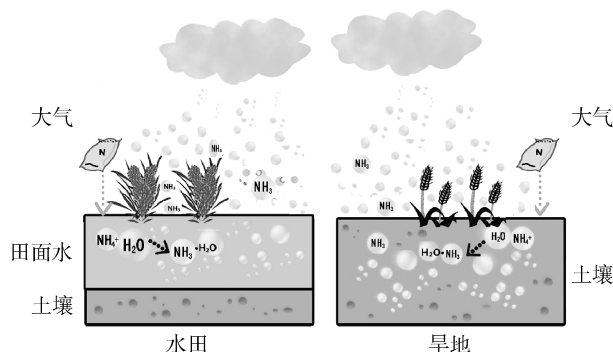


图 1 农田生态系统中氨挥发过程示意图

Fig. 1 Generations of ammonia volatilization in different agro-ecosystems

2 农田氨挥发的影响因素

农田氨挥发受气候、土壤和人类活动等诸多因素的影响,同时各因素之间又相互作用、交互影响。其中,气候条件、土壤性质、田间管理措施是影响农田氨挥发的主要因素。

2.1 气候条件

不同的气候环境,氨挥发过程差异较大。影响氨挥发的气候因素主要有:温度、降雨、光照、空气湿度和风速。

2.1.1 温度 温度是影响氨挥发的重要因素。一般来说,温度升高会增加氨挥发量和速率,缩短氨挥发的持续时间^[14-15]。一方面,温度升高会促使氨态氮在液相中的比例增加;另一方面,土壤深层的 NH_3 易随土壤水分运动上升到表层^[16], NH_3 和 NH_4^+ 的扩散速率随之加快^[1], 促进氨挥发过程。而对于施用尿素的农田,脲酶的活性会随温度的升高而增大,尿素会很快水解成铵态氮,易于氨挥发发生^[15]。但有研究证明,当温度升高到 20°C 后,氨挥发损失量基本不再改变^[17]。这主要是由于硝化、矿化等氮素转化过程与氨挥发之间存在一定的竞争关系^[1], 温度升高,加大了上述过程与氨挥发的竞争^[17], 可能会消耗部分氨挥发底物^[1], 导致氨挥发损失增量不明显^[16]。

三峡库区属于中亚热带湿润季风气候,冬暖春早,夏热秋多雨,年平均气温主要在 $12 \sim 19.1^\circ\text{C}$ ^[18], 利于氨挥发产生。在全球变暖的背景下,近年来库区年平均气温有显著升高趋势,冬季气温升幅最大^[19], 从而可能会增加土壤中脲酶的活性,同时对氨挥发速率及其峰值的出现时间、持续时间和氨挥发损失量等

均有一定影响,但目前尚无相关报道。因此,将来可以进一步探讨在库区局部气候变化背景下农田氨挥发规律及其主导因素。

2.1.2 降雨 降雨时间和降雨量对氨挥发存在一定影响^[16,20]。降雨对氨挥发的作用原理是氮肥随雨水下渗至土壤深处,增加了土壤颗粒吸附带正电荷的 NH_4^+ 的几率和已形成的 NH_3 扩散至土壤表层的阻力,降低了表层土壤铵态氮的浓度,从而抑制了氨挥发^[16,20]。降雨量与氨挥发量呈负相关,但少量降雨能增加旱地中的土壤水分而促进氨挥发^[16]。

三峡库区降雨充沛,其中 5 月至 10 月雨水相对集中,降雨量在 $800 \sim 1\,500\text{ mm}$ ^[18,21]。降水形成的地表径流和土壤充分融合,改变土壤中氨挥发底物即液相铵态氮的浓度^[6]。在紫色丘陵区典型小流域中,铵态氮是地表径流中氮素存在的主要形式之一。雨季时,其浓度偏高,在 0.4 mg/L 左右波动^[24]。因此,库区农田氨挥发可能由于降雨而受到抑制。冯明磊^[23]通过对三峡库区张家冲小流域降雨的定点监测指出,随着降雨的持续,径流中铵态氮浓度由高值逐渐降低并趋于稳定,径流若与土壤作用,能减少氨挥发的损失量,但是需要关注由径流引起的氮素损失。在我国南方红壤区和镇江丘陵区的稻田氨挥发研究中也获得了相似的结果,阴雨天导致氨挥发速率下降,推迟了氨挥发峰值出现的时间^[16,20]。

2.1.3 光照 农田氨挥发会随着光照增强而增加^[3,20]。在太湖地区的稻田中,光照强的晴天比光照弱的多云和阴雨天具有更高的氨挥发量^[3]。此外,充足的光照还会使得稻田中藻类繁殖旺盛,促使 pH 升高,促进氨挥发进程^[7]。

三峡库区年光照时数大多在 $1\,300 \sim 1\,400\text{ h}$ ^[8], 属于典型的寡日照地区,太阳辐射随季节而变化,秋冬季差异较大,轻雾日数和霾日数较多^[24]。这些区域特征可能影响到施肥后库区农田氨挥发过程,光照强度减弱,可能降低氨挥发强度,但其时空分异规律及其内在驱动机制目前尚不清楚,还需进一步研究。

2.1.4 空气湿度和风速 空气湿度和风速也会影响氨挥发,但两者在机理上存在差异。空气湿度和风速由于受到地表状况的作用,相关报道中二者与氨挥发的关系结果不尽一致。有学者认为,较高的空气湿度会降低水气或土气界面的气压差,或是将挥发的 NH_3 溶于空气中,迫使其又重新凝结并重返土壤,直接或者间接地抑制氨挥发^[25-26]。但也有报道表明,较高的空气湿度有助于尿素的溶解,为氨挥发过程提供必要的底物条件,反而会促进氨的挥发^[27]。国外研究者发现,氨挥发与风速之间呈线性或指数关系^[1], 但

Cai 等^[14]指出,风速对国内稻田氮挥发的作用并不明显。这主要与研究时考虑的因素不同有关,前者主要考虑田面水中的氨分压和风速,而后者主要考虑风到达施肥地的距离和空气层的高度^[1,14]。

三峡库区自蓄水以后,空气湿度增大^[23],年均和季均风速整体上减小^[8]。鉴于两者与氮挥发之间复杂的关系目前尚不明确,下一步应明晰二者在库区农田氮挥发过程中的作用。

2.2 土壤因子

土壤性质是影响农田氮挥发的重要因素,主要包括有机质、土壤水分、土壤 pH、阳离子交换量(CEC)、黏粒含量和 CaCO_3 含量等,在不同的研究区域和立地条件下影响农田氮挥发的土壤性质主控因子往往差异较大。

2.2.1 有机质 一般认为,有机质在分解过程中生成的有机酸,会导致土壤的 pH 下降,且所形成的腐殖质也会增大土壤的吸附能力,抑制氮的挥发^[28]。在三峡库区新政小流域紫色土坡耕地的研究表明,在等氮条件下,施用有机肥(粪肥)的氮挥发损失量明显高于仅施用化肥的氮挥发损失量^[13]。李菊梅等^[29-30]采用密闭气室法研究红壤双季稻区的氮挥发,结果发现有机肥施用后的氮挥发损失量也不同,顺序为:化肥>有机无机肥配施>有机肥,随着有机肥施用比例的增加氮挥发损失量逐渐降低。但也有研究认为,有机质能有效阻止 NH_4^+ 进入黏土矿物的固定位置或防止矿物晶层间距的收缩,从而增加液相 NH_4^+ 的浓度,促进氮挥发^[31]。

2.2.2 土壤水分 碳铵的溶解和尿素的水解等过程对土壤水分状况比较敏感,土壤含水率通过对肥料的转化过程影响农田氮挥发。当土壤含水量较低时,氮素的溶解和尿素的水解受到阻碍,从而使得氮挥发受阻;当土壤含水量过高时,降低了土壤液相中铵态氮的浓度,也会阻碍氮挥发。所以,只有适宜的土壤含水量才有助于氮挥发^[1,32]。诸如旱地由于其土壤含水量较低,氮肥水解或溶解的速率慢,氮挥发峰值集中出现在灌水过后^[1],一般比同等条件下水田晚 4~5 天^[3-4,7]。

研究表明,氮挥发累积量与对应的时间满足 Elovish 动力学方程,氮挥发通量的峰值会随土壤含水量的增加而提前^[4,32],存在土壤含水量的临界值^[33]。不同土壤类型适宜氮挥发的土壤含水量范围不同^[4,32-33]。红壤的含水量在 10%~25%^[34]时,对氮挥发有较强的促进作用;黄绵土利于氮挥发的土壤含水量为 4%~8%^[32]。受土壤持水能力、落干时间和农田灌水等因素的影响,三峡库区土壤体积含水率在 3.1%~76.2%,

平均值为 42.7%^[35]。在这种土壤含水量较高的条件下,库区农田氮挥发峰值出现的时间可能会提前,氮挥发累积量也应满足 Elovish 动力学方程,但还未见有关库区农田氮挥发含水量阈值的报道。

2.2.3 其他土壤因子 影响氮挥发的其他土壤因子还包括土壤 pH、阳离子交换量(CEC)、黏粒含量和 CaCO_3 含量等,但目前鲜见三峡库区相关研究报道,但通过库区土壤的基本性质和立地条件可以推测,土壤 pH^[1,32]和 CaCO_3 含量^[1]与氮挥发呈正相关,而土壤黏粒含量和阳离子交换量(CEC)^[34]则与氮挥发呈负相关,但相关程度和主导因素仍需进一步验证和研究。

2.3 田间管理措施

农田生态系统里,人类的痕迹非常明显,田间管理等人为活动都可能影响农田氮挥发,其中又以施肥和耕作管理措施影响最大。

2.3.1 施肥因子 三峡库区氮素来源主要是化肥氮^[36-37],而氮肥施用可显著促进库区土壤氮挥发,与施氮量呈正相关^[38]。通过对三峡库区张家冲流域养殖型农户、柑橘种植户、茶叶种植户、蔬菜种植户和传统种植户的对比,发现这 5 种农户类型农田盈余氮量过高(44%)^[23],过量施氮加剧了地区氮挥发。施用不同类型的氮肥对土壤氮挥发影响不同,三峡库区新政小流域的紫色土坡耕地中,施用了 3 种不同类型的氮肥,碳铵、尿素、复合肥三者氮挥发速率为:碳铵>尿素>复合肥^[13],这主要与碳铵的易挥发性有关。氮肥深施有利于减少氮挥发已被大量试验证实,而且随施肥深度的增加氮挥发损失率呈下降趋势^[15,35,40]。但三峡库区的农户多采用传统表土施肥方式,造成当地氮挥发损失占施氮量的比重较大,略高于全国水平(表 1),氮肥利用效率低^[12,41]。

2.3.2 农田管理措施因子 研究不同土地利用方式对氮挥发的影响有助于丰富我们对库区氮挥发的认识。一般来说,水田氮挥发损失高于旱地。水田和旱地的氮挥发量分别占总施氮量的 5%~47%,1%~17%^[1]。在三峡库区新政小流域的氮挥发研究中,无论在水田或旱地施用尿素或碳铵,水田氮挥发速率均高于旱地,这可能与水田的土壤水分状况较适宜尿素水解或碳铵溶解有关^[12],这与前人研究结果相似^[1]。

此外,一些学者还研究了其他地区的农田管理因子,如灌溉时间^[40]、灌水量^[40]、灌溉方式^[42]等都对氮挥发有不同程度的影响。如在相同土壤含水量、灌水量、施肥量下,延迟灌水时间会加快氮挥发的速率,而加大灌水量则会降低氮挥发的速率和累积量,缩短挥发时间^[40]。此外,稻草还田覆盖也能适当降低氮挥发量^[20]。

表 1 我国典型农田氨挥发状况
Table 1 Brief summary of ammonia volatilization for agro-ecosystem in China

研究区域 (年份)	土壤类型	氮肥类型	施氮量(kg/hm ²)	氨挥发总量(N, kg/a)	占施氮量百分比(%)
全国(2005)	—	尿素, 碳铵	—	3.6×10 ⁹	13.2 ^[5]
全国(1990)	—	尿素, 碳铵	—	1.8×10 ⁹	11 ^[2]
三峡库区新政小流域(2009)	紫色土	尿素, 碳铵	234.7 ~ 1 372.1	2 132.2	17.6 ^[11]
三峡库区张家冲小流域(2005)	石英砂土	尿素, 复合肥	233	1933	10.6 ^[37]
川中丘陵区(2006)	紫色土	碳铵	6321	1 226.2*	19.4 ^[38]
太湖地区(2002)	乌栅土	尿素	135 ~ 270	42.2 ~ 88.1	18.6 ~ 38.7 ^[3]
南方红壤区(2001)	红壤	尿素	150	57.4 ~ 59.1	37.7 ~ 37.9 ^[29]
华北平原(1999—2000)	—	—	397	60.0	15.1 ^[39]
镇江丘陵区(1995—1997)	水稻土	尿素	100 ~ 300	2.1×10 ⁻⁹ ~ 25.3×10 ⁻⁹	7 ~ 21.6 ^[20]

注：* 含反硝化和氨挥发的损失量。

各地区农田氨挥发量占施氮量比例的空间变异性大(表 1), 就目前的研究结果看, 三峡库区的农田氨挥发量^[11,37]占施氮量的比重处于中等水平, 高于华北平原区^[39], 低于镇江丘陵区^[20]、太湖地区^[3]和南方红壤区^[29]。这与研究区域的气候条件、土壤类型及施肥状况等有关。可见, 氨挥发过程是多种因素综合作用的结果, 但在不同研究区域中主导因素又有较大差异, 这就增大了相关方面的研究难度。诸如, 不同蓄水水位对库区微气候和生态环境的改变, 在一定程度上会改变土壤水分、有机质、全氮含量等土壤理化性质, 进而影响到氨挥发过程。另外, 三峡库区农田生态系统分布面积最广的土壤类型是紫色土, 占耕地面积的 78.7%^[11,35], 多呈中性和弱碱性^[35], 且库区温度较高^[18], 空气湿度大^[23], 比较利于氨挥发过程。不合理的土地利用和落后的耕作管理技术可能加剧氨挥发损失。因此, 探索符合三峡库区实际的合理土地利用模式和科学的田间管理措施是提高该地区氮肥利用率、减少生态环境活性氮负荷的重要途径。

3 农田氨挥发消减的途径

3.1 改进传统的施肥技术

传统施肥多习惯于表施或“有水层混施”, 存留于土壤表层的氮肥易于通过氨挥发而损失^[12,18,41]。采用深施覆土的方法^[40], 能降低表层土壤的氮肥浓度, 起到抑制氨挥发的作用。试验证明, 在同一施氮量水平下, 深施与表施相比, 氨挥发损失率大约能降低 50%, 同时增加氮在土壤中的移动, 肥效较好^[43]。此外, 表施后及时灌水也能达到与深施同样的效果^[44]。而基肥无水层混施, 追肥“以水带氮”的深施技术^[45], 能使氨挥发损失率降低 20% 左右^[46]。

3.2 配施缓释剂或缓释肥等新型肥料

施用缓释剂或缓释肥等新型肥料是减少农田氨

挥发损失又一有效措施。缓释剂能延长氮肥肥效, 提高利用率。如脲酶抑制剂 NBPT, 能延缓尿素水解, 增加尿素随水分运动渗入到土壤深层的机会, 从而降低土壤表层铵态氮及氨态氮的浓度^[1,47], 降低铵态氮的峰值, 氨挥发损失可减少 53% 以上^[47]。

包膜氮肥作为一种缓释肥, 其原理是包膜控制着氮肥通过微孔、缝隙等的速率, 缓慢地释放养分, 降低氮肥的溶解速率, 使得表土层铵态氮的浓度维持在较低的水平^[44]。施用包膜氮肥后, 土壤氨挥发的损失率比普通氮肥降低 34.6% ~ 71.2%^[48-49]。且不同膜质材料的包膜氮肥在抑制氨挥发过程中的效果不同^[50]。然而, 某些包膜材料不能排除对环境的污染, 目前正试图通过研制新型非包膜缓释肥料来限制氨挥发。相比等氮量的普通复合肥, 非包膜缓释肥料能减少 20% 以上的氨挥发^[51]。但就效果来看, 与包膜肥料有一定差距, 氨挥发总损失量比包膜肥料高 47.2% ~ 62.6%^[51]。

3.3 加强农田措施管理

合理的农田管理措施能间接地或直接地抑制氨挥发。间接法多采用覆盖的方式, 如在稻田中采用表面分子膜, 它能减少土壤水分蒸发, 抑制氨气向大气的扩散过程, 常用的有 16 醇乙醇溶液。施入 16 醇乙醇溶液后, 氨挥发损失量下降 36.8% ~ 44.0%; 然而, 由于大风、微生物分解的缘故, 16 醇表面膜不能长期存在^[1]。垄作覆膜也能大幅度地减少氨挥发, 与平作处理相比, 氨挥发损失由 1.6% 降为 0.2% ~ 0.4%^[52]。直接法则主要通过控制施肥量^[37]和水分管理方式^[43]实现, 明确灌溉时间和灌水量, 旱作农业时可采取大量、少次灌水的方式^[43]。

4 研究展望

氨挥发作为库区氮素气态损失的主要形式。纵观

国内外农田氮挥发的研究,目前库区仍缺少对氮挥发损失进行有针对性地机理性研究,建议今后可以从以下几方面深入研究:

(1) 加强库区农田氮挥发损失的原位监测。目前,对库区农田氮挥发量的估算,大多采用实验室模拟或运用氮损失转化系数进行换算^[11,13,37]。但模拟实验的环境条件(如光照、温度、土壤等)及所采用的转化系数难以控制到与流域所在的环境条件完全一致。因此,为准确估算出库区农田氮挥发损失量,应加强长期对农田氮挥发的原位监测,并与室内模拟分析紧密结合,揭示库区蓄水后农田氮挥发的规律和影响因素。

(2) 加强区域特殊因素对农田氮挥发影响机理的研究。库区蓄水后,特别是由于目前运行的水位调度方案的变化,造成库区局地气候和自然环境变化,进而影响到库区农田生态系统的氮素迁移转化。而氮挥发作为氮素转化中的重要一环,就目前来看,库区农田氮挥发研究还多止于对现象的观测和描述上,尤其是在三峡水库水位脉动条件下,氮挥发对自然环境和土壤环境因素响应的研究还不够深入。三峡库区土地利用类型多样,以往氮挥发的研究多是关于水田和旱地^[11,13],而除农田外的其他典型土地利用方式(果园、菜地、林地等)也是库区土地利用的重要类型,其氮挥发损失还未见相关报道。

(3) 加强库区多层次、分区域不同时空尺度氮挥发的研究和评估。了解典型小流域的氮挥发情况,是精确估算整个库区氮挥发损失量的基础。现有的三峡库区氮挥发研究还仅局限在几个特定的小流域^[12,23],缺乏对整个库区和其他典型小流域氮挥发量及其随时间变化的研究。如果忽略了小流域之间各种因子在不同时间的交互作用,可能会造成库区大流域氮挥发损失量汇总结果的偏差。在氮挥发时空变化研究的同时,结合农田和其他土地利用方式,编制排放清单,为库区氮素管理提供理论依据。

(4) 三峡大坝建成并运行后,水库实行“蓄清排浑”的调度方案,夏季低水位运行(145 m),冬季高水位运行(175 m)。因而,在145~175 m高程的库区两岸,形成与天然河流涨落季节相反、涨落幅度高达30 m的水库消落带,是我国面积最大的水库消落带,达到348.9 km²。消落带湿地本属于生态保护区,但其出露期正值水热条件适宜、作物生长旺季,后靠移民多延续利用消落带湿地。由于缺乏整体规划和配套措施,土地利用无序、随机现象普遍(图2),作物种植零星,耕作管理方式传统、粗放,氮肥施用多存在表施、过量、有机肥配施不合理等问题^[13,41],可能造

成大量的氮挥发损失。然而目前并无相关研究报道,因此可以通过研究消落带湿地不同土地利用方式下氮挥发过程,以及揭示周期性水位脉动导致的土壤结构和质地变化、干湿交替、有机质和pH变化、土壤微生物结构、功能动态变化,以及酶活性等氮挥发的影响,为三峡库区生态环境保护,以及消落带湿地生态友好型利用模式探索和优化提供理论依据。



图2 三峡库区消落带湿地土地利用现状图

Fig. 2 Situation of land use in water level fluctuating zone of the Three Gorges Area

参考文献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1992
- [2] Xing GX, Zhu ZL. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57 (1): 67-73
- [3] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 杨林章, 周健民. 太湖地区稻田氮挥发及影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 265-269
- [4] 周静, 崔键, 王霞. 红壤不同含水量对尿素氮挥发的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(6): 930-933
- [5] Zhang YS, Luan SJ, Chen LL, Shao M. Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 480-493
- [6] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 稻田氮肥的氮挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1 884-1 888
- [7] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 商庆银, 周毅, 谢小立, 沈其荣, 郭世伟. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氮挥发的影响[J]. *中国水稻科学*, 2009, 23(1): 85-93
- [8] 王波. 三峡工程对库区生态环境影响的综合评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2009
- [9] 重庆市统计局. 重庆市统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011: 533
- [10] 周彬, 董杰, 葛兆帅, 舒肖明, 刘泽华, 陈可锋. 三峡库区人地关系及其协调发展途径研究[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(2): 74-78

- [11] 刘京, 郭劲松, 方芳, 陈猷鹏, 李哲. 三峡库区紫色土坡耕地典型种植模式氮收支[J]. 深圳大学学报(理工版), 2011, 28(6): 541–547
- [12] 郭劲松, 刘京, 方芳, 孙军益, 孙志伟, 杜立刚. 三峡库区紫色土坡耕地小流域氮收支估算及污染潜势[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, 34(11): 141–147
- [13] 刘京. 三峡紫色土坡耕地小流域氮磷收支及流失风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010
- [14] Cai GX, Chen DL, Ding H, Pacholski A, Fan XH, Zhu ZL. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2/3): 187–195
- [15] 邹长明, 颜晓元, 八木一行. 淹水条件下的氮挥发研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 167–170
- [16] 吴萍萍. 不同施肥制度下红壤稻田氮挥发与氧化亚氮排放的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008
- [17] Whitehead DC, Raistrick N. Effects of some environmental factors on ammonia volatilization from simulated livestock urine applied to soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11(4): 279–284
- [18] 刘祥梅, 郭志华, 肖文发, 王建力, 杨海明, 何红艳. 基于 GIS 的三峡库区生态环境综合评价——气候评价[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 613–622
- [19] 刘晓冉, 杨茜, 程炳岩, 张天宇. 三峡库区 21 世纪气候变化的情景预估分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(1): 42–47
- [20] 田光明, 蔡祖聪, 曹金留, 李小平. 镇江丘陵区稻田化肥氮的氮挥发及其影响因素[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 324–332
- [21] 徐之华, 黄健民. 长江三峡库区气候特征与生态环境[J]. 四川气象, 2002, 22(3): 22–24
- [22] 朱波, 汪涛, 徐泰平, 况福虹, 罗专溪, 高杨. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 601–606
- [23] 冯明磊. 三峡地区小流域氮循环及其对水体氮含量的影响[D]. 湖北: 华中农业大学, 2010
- [24] 赵东, 祝昌汉, 罗勇, 高歌. 三峡库区太阳能资源基本特征及其演变[J]. 自然资源学报, 2009, 24(11): 1 984–1 993
- [25] 习斌, 张继宗, 左强, 邹国元, 翟丽梅, 刘宏斌. 保护地菜田土壤氮挥发损失及影响因素研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 327–333
- [26] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氮挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 35–39
- [27] Cabrera ML, Kissel DE, Craig JR, Qafoku NP, Vaio N, Rema JA, Morris LA. Relative humidity controls ammonia loss from urea applied to loblolly pine[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(2): 543–549
- [28] 葛顺峰, 姜远茂, 彭福田, 房祥吉, 王海宁, 东明学, 刘建才. 春季有机肥和化肥配施对苹果园土壤氮挥发的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 199–203
- [29] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 李冬初, 宝川靖和, 八木一行. 有机肥无机肥配施对稻田氮挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 51–56
- [30] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 申华平, 秦道珠. 红壤双季稻田不同施肥下的氮挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1 610–1 613
- [31] 张庆利, 张民, 杨越超, 路继峰. 碳酸氢铵和尿素在山东省主要土壤类型上的氮挥发特性研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 32–34
- [32] 高鹏程, 张一平. 氮挥发与土壤水分散失关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 22–26
- [33] 魏玉云. 热带地区砖红壤上不同土壤 pH 和含水量对尿素氮挥发的影响研究[D]. 海南: 华南热带农业大学, 2006
- [34] Fenn LB, Kissel DE. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(3): 394–398
- [35] 王征. 三峡库区消落带土壤有机质和氮素含量及分布特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012
- [36] Liu C, Watanabe M, Wang Q. Changes in nitrogen budgets and nitrogen use efficiency in the agro-ecosystems of the Changjiang River Basin between 1980 and 2000[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(1): 19–37
- [37] 林杉, 冯明磊, 胡荣桂, 刘仁燕, 魏谋勇, 姜诚. 三峡库区小流域农户氮循环和排放特征[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 632–638
- [38] 朱波, 彭奎, 谢红梅. 川中丘陵区典型小流域农田生态系统氮素收支探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 108–111
- [39] Zhang YM, Chen DL, Zhang JB, Edis R, Hu CS, Zhu AN. Ammonia volatilization and denitrification losses from an irrigated maize-wheat rotation[J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 533–540
- [40] 徐万里, 刘骅, 张云舒, 汤明尧, 王西和, 唐光木. 施肥深度、灌水条件和氮挥发监测方法对氮肥氮挥发特征的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(1): 86–93
- [41] 周鑫斌, 温明霞, 王秀英, 樊晓翠, 孙彭寿, 石孝均, 李伟, 戴亨利. 三峡重庆库区柑橘园氮素平衡状况研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 88–94
- [42] 马腾飞, 危常州, 王娟, 侯振安, 王肖娟, 彭振宝, 张波. 不同灌溉方式下土壤中氮挥发损失及动态变化[J]. 石河子大学学报, 2010, 28(3): 294–298
- [43] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 万云静, 刘树庆. 不同施肥方式对土壤氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99–104
- [44] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 黄彬香, 陈新平, 张福锁, Martin K, Volker R. 华北平原冬小麦夏玉米轮作体系氮肥的氮挥发[J]. 中国环境科学, 2007, 7(3): 409–413
- [45] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6
- [46] 许露生. 太湖地区水稻优化施氮模式及其环境效应的研究[D]. 江苏: 扬州大学, 2006
- [47] 彭玉净, 田玉华, 尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氮挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 19–23
- [48] Sun KJ, Mao XY, Lu QM, Jia AP, Liao ZW. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors[J]. The Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2 347–2 350
- [49] 卢艳艳, 宋付朋. 不同包膜控释尿素对农田土壤氮挥发

- 的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7 133–7 140
- [50] 邹洪涛, 张玉龙, 黄毅, 杨宇, 虞娜. 不同膜质材料制成包膜肥料对抑制氮素挥发效果的研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 519–521
- [51] 胡小凤, 王正银, 游媛, 李精超. 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1 938–1 943
- [52] 上官宇先, 师日鹏, 韩坤, 王林权. 垄作覆膜条件下冬小麦田的氨挥发研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 163–168

Ammonia Volatilization and Its Reducing Countermeasures in the Agro-ecosystem of the Three Gorges Area: A Review

YANG Shan^{1,2}, WU Sheng-jun², WANG Yu², ZHOU Wen-zuo¹, CHENG Hui²,
YE Fei², HUANG Pei², HUANG Ping^{2*}

(1 School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2 Key Laboratory of Reservoir Aquatic Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: From the generating mechanism of ammonia volatilization, this review summarized the local influencing factors of ammonia volatilization, such as climatic conditions, soil features, management measures, and its countermeasures in the Three Gorges Area. However, related investigations were sparse in this area. In the forthcoming studies, monitoring methodology, different temporal and spatial scales, local and special impacting factors, could be of great interests in further investigations on ammonia volatilization in the Three Gorges Area.

Key words: Ammonia volatilization, Impact factors, Three Gorges Area, Agro-ecosystem